III

Travaux Pratiques

Travaux Pratiques 1

Etude de champs magnétiques

Sommaire

Les annexes afférentes à cette séance de TP sont les annexes B, C et F

1.1 Introduction

1.1.1 Rappels de cours

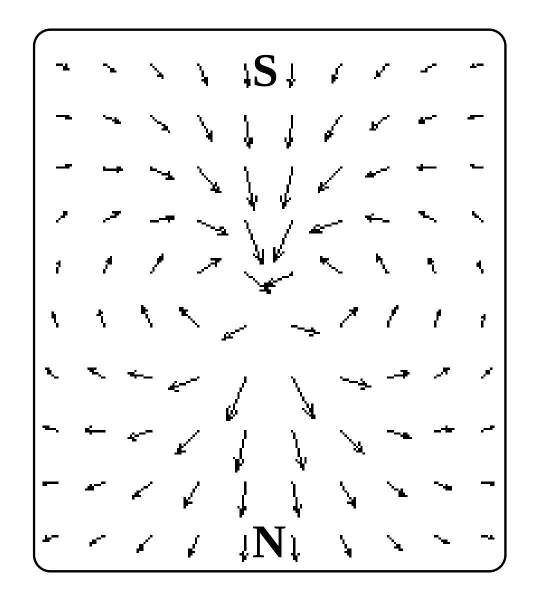
Définitions

a. Propriété
Une charge électrique en mouvement crée, dans tout l'espace, un champ magnétique noté $\overrightarrow{\mathbf{B}}$.
b. Définition d'un champ
Par définition, un champ, en physique, est une fonction qui, à chaque point de l'espace, associe une valeur. Un exemple simple est celui du champ de température : en chaque point M de l'espace d'une salle de cours (par exemple) on associe un nombre réel qui caractérise ce point. Lorsque la caractéristique est décrite par un réel (cf la température) on parle de **champ scalaire**. Le champ magnétique, quant à lui, est un **champ vectoriel** : c'est à dire une fonction qui à tout point de l'espace, associe un vecteur. Il faut donc trois grandeurs indépendantes pour le caractériser. Ainsi, le vecteur peut être décrit par sa projection dans une base (base cartésienne par exemple, voir annexes B et C).
Alternativement, on peut le définir par son sens (donné par un un vecteur unitaire $\overrightarrow{\mathbf{u}}$), et sa norme, notée $||\overrightarrow{\mathbf{B}}|||$. On peut donc utiliser les diverses notations :

$$\overrightarrow{\mathbf{B}} = ||\overrightarrow{\mathbf{B}}||\overrightarrow{\mathbf{u}}$$

ou encore

$$\overrightarrow{\mathbf{B}} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \text{ dans une base cartésienne}$$



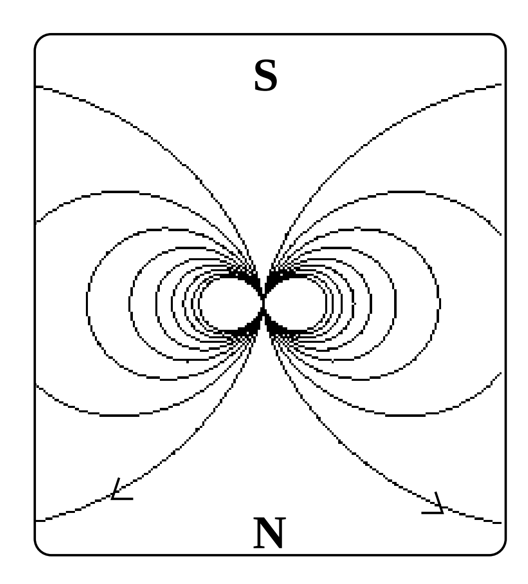


FIG. 1.1 – Deux représentations du champ créé par un dipôle magnétique (ou aimant) : à gauche, le champ est représenté par des vecteurs en de nombreux points du plan, à droite, seules figurent des lignes de champ. Attention, contrairement à ce que peut faire croire la figure de droite, les lignes de champ magnétique sont TOUJOURS fermées - même si elles sortent du cadre sur cette représentation.

Alors :

$$||\overrightarrow{\mathbf{B}}|| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$$

Pour alléger les notations, on utilise souvent une seule lettre pour la norme du vecteur, soit :

$$B = ||\overrightarrow{\mathbf{B}}||$$

qui est un nombre réel positif.
Il s'agit d'être vigilant aux notations utlisées puisque les projections du vecteur sur les axes de base sont, elles, des quantités **algébriques**. On écrira alors :

$$\overrightarrow{\mathbf{B}} = B\overrightarrow{\mathbf{u}}$$

c. Mode de représentation
On peut naturellement représenter le champ magnétique par un ensemble de vecteurs, de même direction que le champ magnétique, et dont la longueur est proportionnelle à l'intensité du champ (voir figure 1.1, à gauche). Pour un dipôle électromagnétique, la zone d'où "sortent" les flèches des vecteurs est appelée pôle Nord, et la zone dans laquelle les flèches semblent entrer est le pôle Sud.
Pour représenter le champ magnétique, on peut aussi utiliser les "lignes de champ" (voir figure 1.1, à droite). Ces lignes sont définies par la propriété suivante : en chaque point M de l'espace, le vecteur $\vec{B}(M)$ est tangent à la ligne de champ passant par M. On a alors les propriétés suivantes :
- une ligne de champ magnétique est toujours fermée : elle est orientée dans le même sens que le champ,
- la norme du champ est d'autant plus grande en un point (donc le champ d'autant plus intense) que les lignes de champ y sont rapprochées.

d. Unité
L'unité de mesure de l'intensité du champ est le tesla (T) ; c'est une unité relativement grande, au sens où les champs couramment mesurés sont en général de l'ordre du millitesla.

Appareils de mesure

Les outils généralement utilisés pour mesurer le champ magnétique sont l'aiguille aimantée et le teslamètre.

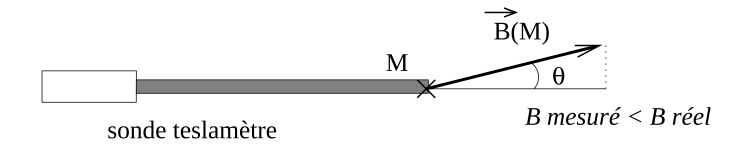
L'aiguille aimantée (ou boussole) permet d'avoir accés à la direction du champ, le nord de l'aiguille donnant le sens du champ.

Le teslamètre est un appareil électronique équipé d'une sonde qui transforme le champ magnétique en différence de potentiel (par effet Hall), reliée à un boîtier sur lequel on peut lire une valeur. Cet appareil mesure non pas la norme B du champ magnétique, mais la projection du champ sur l'axe de la sonde (sonde axiale). On mesure donc le produit scalaire (voir rappels annexe B) entre le champ $\overrightarrow{\mathbf{B}}$ et le vecteur $\overrightarrow{\mathbf{u}_{\text{sonde}}}$ directeur de la sonde, soit :

$$B_{\text{mesur}} = \overrightarrow{\mathbf{B}}.\overrightarrow{\mathbf{u}_{\text{sonde}}} = B\cos\theta$$

(si θ est l'angle entre la sonde et la direction du champ).
Si la sonde est placée perpendiculairement au champ, la valeur mesurée sera nulle quelle que soit l'intensité réelle du champ !

Pour mesurer la norme du champ magnétique, il est donc nécessaire de **mesurer d'abord l'orientation du champ, puis de placer la sonde du teslamètre selon cette direction** (voir schéma 1.2).



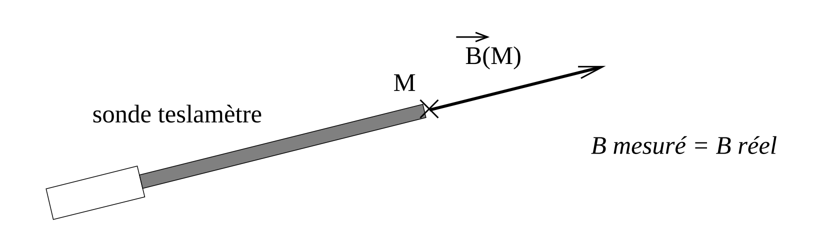


FIG. 1.2 – Utilisation de la sonde du teslamètre.

L'annexe F explicite le principe ainsi que la mise en œuvre d'une cellule de mesure par effet Hall. Il est recommandé de s'y référer afin de bien saisir l'importance de l'orientation de la sonde.

Exemples courants

Le champ le plus classique est le champ magnétique terrestre, créé dans les zones internes de la planète. Il est dirigé vers le pôle nord magnétique terrestre, qui est presque confondu avec le pôle nord géographique (intersection de la sphère terrestre avec son axe de rotation). Sa norme est comprise entre 0,03 et 0,06 mT.

Les autres champs magnétiques qu'on rencontre couramment sont les champs créés par des aimants ou par des circuits électriques. L'origine du champ créé par un aimant est microscopique, liée à des matériaux spécifiques. Le champ définit dans l'aimant un pôle nord et un pôle sud : les lignes de champs "sortent" par le pôle nord et "entrent" par le pôle sud. Un courant électrique est, par définition, un déplacement de porteurs de charge : il crée donc toujours un champ magnétique. Dans le cas d'un enroulement, le sens du champ magnétique est donné par la règle du tire bouchon : si celui-ci est placé selon le sens d'enroulement de la bobine, avec un courant circulant dans ce sens, il pointe dans la direction du vecteur champ magnétique.

On rappelle quelques formules classiques donnant la norme du champ créé par des systèmes électriques :
- champ créé en son centre par une bobine de N spires de rayon R, parcourues par le courant I :

$$B(O) = \frac{\mu_0 NI}{2R}$$

- champ créé par un solénoïde long (c'est à dire pour lequel la longueur est beaucoup plus grande que le rayon : $l > 10\,R$) à l'intérieur du solénoïde :

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l}$$

On rappelle également la valeur de la permittivité du vide : $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}T.m.A^{-1}$.

1.1.2 Présentation du matériel

Ce TP a pour but de se familiariser avec les instruments de mesure du champ magnétique, ainsi qu'avec quelques dispositifs classiques de création de champ magnétique.

Description

Le matériel d'étude comprend :
- un générateur de courant,
- un teslamètre,
- des petites boussoles,
- une bobine électrique,
- un solénoïde long.

Mise en garde : Attention à bien respecter les limites en courant imposées par les bobines ! Des courants de 1 ampère sont de forts courants, à manipuler avec un minimum de précaution. On fera notamment vérifier le montage par un enseignant avant d'allumer l'alimentation.

1.1.3 Utilisation des instruments de mesure

Contrairement à beaucoup de grandeurs mesurées en physique, le champ magnétique n'est pas une grandeur scalaire mais un vecteur, ce qui rend sa mesure plus délicate. On se servira donc de deux instruments pour pouvoir connaître le vecteur champ magnétique en un point M : d'abord la boussole, qui donnera le sens et la direction du champ magnétique, puis la sonde du teslamètre qui, placée selon cette direction, donnera la norme du vecteur.

1. La boussole donne la direction et le sens du vecteur. On la placera sur un plan horizontal, le centre de l'aiguille placé sur le point M.

2. La sonde du teslamètre est d'une forme un peu compliquée car elle peut servir à différents types de mesures. Pour ce qui concerne ce TP, on placera l'extrémité de la sonde sur le point M, tout en veillant à placer la sonde dans le sens et la direction du vecteur champ magnétique, donnés par la boussole.

1.2 Champ créé par une bobine simple

1.2.1 Etude qualitative

On alimente la bobine en courant continu. A l'aide des différents instruments de mesure disponibles, répondre aux questions préliminaires suivantes.
1. Trouver le pôle nord de la bobine. Que se passe-t-il lorsqu'on change le sens du courant (faire un schéma) ?
2. Trouver les points de l'espace où le champ est d'intensité maximale, puis les points de l'espace où le champ est d'intensité minimale. On donnera la méthode expérimentale puis une interprétation théorique.
3. Montrer que la sonde du teslamètre mesure bien la projection du champ sur son axe (on détaillera l'expérience réalisée et son résultat).
4. Quel est l'ordre de grandeur de la norme du champ créé par la bobine ? Comparer au champ magnétique terrestre, conclure.

1.2.2 Tracé du champ

Relever la direction (à l'aide d'une boussole), puis la norme (avec le teslamètre) du champ magnétique en une dizaine de points du plan horizontal passant par le centre de la bobine (on pourra s'aider de la feuille modèle disponible). Tracer les vecteurs correspondant sur une feuille de papier millimétrée, en choisissant une échelle appropriée. On n'oubliera pas de noter sur le graphe titre et légende.

En déduire l'allure des lignes de champ.

1.3 Solénoïde

Dans cette partie, on cherche à vérifier la formule théorique donnant le champ magnétique à l'intérieur du solénoïde et à calculer expérimentalement la valeur de μ_0.

1.3.1 Caractérisation du champ à l'intérieur du solénoïde

1. Relever les caractéristiques du solénoïde : rayon R, longueur l, nombre de spires N. Donner également le nombre de spires par unité de longueur $n = N/l$.
2. Le solénoïde peut-il être considéré comme "long" ? Justifier.
3. Alimenter le solénoïde et mesurer la valeur du champ magnétique en différents points de l'intérieur. Commenter.

1.3.2 Champ et courant électrique

1. Comment doit-on placer un ampèremètre dans un circuit électrique (justifier) ?
2. Placer un ampèremètre dans le circuit d'alimentation du solénoïde. Tout en prenant bien soin de ne pas dépasser les valeurs de courant autorisées par le solénoïde et les instruments de mesure, tracer la courbe $B = f(I)$.
3. En déduire une valeur approchée de μ_0. Calculer l'écart relatif entre le résultat mesuré et le résultat théorique :

$$\varepsilon(\text{en}\,\%) = \frac{\mu_0^{\text{théo}} - \mu_0^{\text{exp}}}{\mu_0^{\text{théo}}}$$

L'erreur en pourcentage est-elle raisonnable ? D'où provient-elle ? Conclure.

Travaux Pratiques 2

Initiation à la mesure en Electricité

Sommaire

Les annexes afférentes à cette séances sont les annexes B et E

2.1 Introduction

Le but de ce TP est de s'initier aux mesures en électronique fondamentale. Il s'agit de se familiariser avec la méthodologie expérimentale propre aux mesures électriques. Dans une première partie, on prendra en main l'oscilloscope qui est un appareil de mesure et de contrôle fondamental en électronique. Dans une deuxième partie, on s'attachera à caractériser un circuit analogique standard : le filtre passe-bas. Dans l'annexe E, sont consignés les concepts de base des signaux électriques périodiques ainsi que les définition de mesures électriques habituelles (tension efficace, de crête, ...).

2.2 Présentation de l'oscilloscope

2.2.1 Introduction

L'oscilloscope est un appareil permettant de visualiser des signaux électriques et d'en extraire certaines mesures. Cet appareil, dont la conception remonte au début du vingtième siècle, est excessivement utile en physique expérimentale puisqu'il permet de visualiser des signaux électriques avec un matériel relativement peu onéreux. La complexité grandissante des signaux électroniques mis en jeu dans les appareils de mesure nécessite d'avoir un appareil de contrôle et de mesure relativement simple à utiliser permettant d'appréhender la globalité d'un signal électrique. C'est le rôle de l'oscilloscope.
Le principe de fonctionnement est d'envoyer un faisceau d'électrons sur un écran fluorescent. Cet écan est recouvert d'une substance qui émet de la lumière lorsqu'elle est frappée par un électron. Le faisceau d'électrons est dévié dans l'espace par des électrodes, en fonction du signal observé. Sur l'écran apparait donc un "spot" lumineux dont les variations horizontales et verticales sont commandées par les signaux observés. Ce système de visualisation permet de mesurer et d'avoir une représentation visuelle de phénomènes électriques variant fortement dans le temps (jusqu'à une centaine de millions de fois par seconde).

2.2.2 Fonctionnement

Sur la figure 2.1 est présentée une coupe schématique d'un oscilloscope. L'appareil est composé d'un tube serti, dans lequel

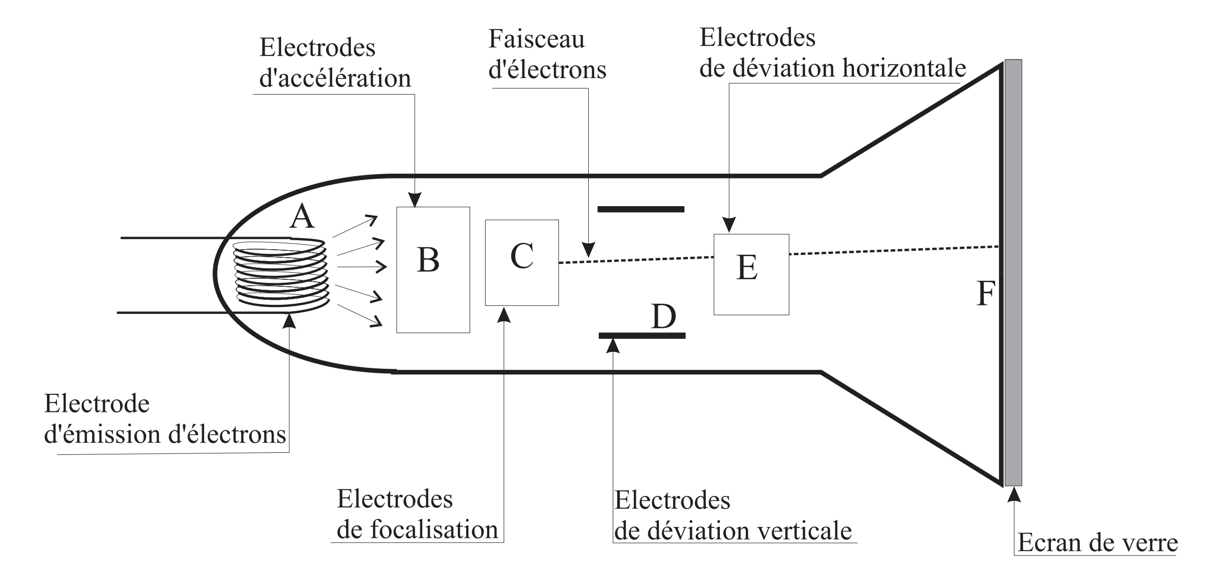


FIG. 2.1 – Schéma d'un oscilloscope

règne le vide (absence d'air). Une électrode de métal (A) permettant d'émettre des électrons est placé au cul du tube. Les électrons émis passent au travers un système d'électrodes d'accélération (B) et de focalisation (C) qui permettent d'avoir un faisceau étroit et rapide. Un jeu d'électrodes horizontales (D) permet de dévier le faisceau verticalement ; un autre jeu vertical (E) permet une déviation horizontale du faisceau. Enfin un écran (F) sur lequel viennent taper les électrons permet de visualiser le spot lumineux. Dans un premier temps, on s'intéresse aux systèmes d'électrodes (D) et (E), qui sont ceux que l'opérateur peut commander.

Si l'on relie le système d'électrodes (D) à une tension, le spot va dévier verticalement sur l'écran. La déviation du spot sur l'écran donne donc une mesure de la tension appliquée aux électrodes (D). On relie le système (E) à une tension variant dans le temps de telle façon que le faisceau traverse horizontalement l'écran en un laps de temps τ et qu'il revienne ensuite à son point de départ pour recommencer. La déviation horizontale est donc un marqueur du temps. Avec ce principe, il est donc possible d'observer l'évolution temporelle de la tension que l'on applique aux bornes du système d'électrodes (D). On peut aussi imaginer de relier (E) à une autre tension, et l'évolution du spot permettra donc de visualiser l'évolution de la tension appliquée aux bornes de (D) en fonction de celle appliquée aux bornes de (E).

Un oscilloscope permet de visualiser et de mesurer des tensions soit en fonction du temps, soit en fonction d'une autre tension.

2.2.3 Mini mode d'emploi

L'oscilloscope possède en général deux entrées de signaux électriques que l'on peut relier aux électrodes (D), laissant (E) sur le système de temporisation. On peut ainsi visualiser sur l'écran, en même temps deux signaux électriques en fonction du temps. Pour que l'image observée soit stable, il faut que le balayage horizontal du faisceau d'électron soit synchronisé avec une des deux tensions observées, c'est la synchronisation de l'appareil.

La synchronisation

Le système de synchronisation du faisceau sur les signaux d'entrée peut se régler par l'opérateur. Sur la face avant de l'appareil, il existe un bouton de commande appelé généralement "SYNC" ou TRIG" qui permet à l'utilisateur de choisir le signal de synchronisation. Dans la très grande majorité des cas, on synchronise le faisceau sur une des deux voies d'entrées de l'oscilloscope (généralement appelées voie A et voie B). Il est, cependant, possible de synchroniser le faisceau sur une entrée appelée synchronisation externe (souvent "EXT" sur l'appareil)

Bien souvent lorsque des signaux ne sont pas visualisables correctement sur l'écran, c'est le système de synchronisation qui

est mal réglé. Dans les manipulations que nous allons faire, il suffira de bloquer la synchronisation sur une des deux entrées de l'oscilloscope.

Les boutons de commande

Sur la plupart des appareils, on retrouve les mêmes boutons de commandes de base. Ces boutons peuvent changer d'appellation d'un type d'appareil à l'autre mais ont le même effet sur tous les oscilloscopes.

Interrupteur : il existe un interrupteur de mise sous tension de l'appareil, qu'il convient d'allumer pour utiliser l'oscilloscope.

Filtre d'entrée : A proximité de chaque voie d'entrée, il exite un curseur noté souvent "AC-DC-GND" ; ce sélecteur filtre l'entrée du GBF.
En position "AC", on enlève la composante continue du signal. Cette position est utile lorsqu'on ne s'intéresse qu'aux variations d'un signal ayant une forte composante continue. Cependant, puisque le signal est filtré, des déformations peuvent apparaître : cette position n'est à utiliser qu'avec précautions, lorsqu'on connaît déjà l'allure du signal à étudier.
En position "DC", on garde les composantes continues et alternatives. C'est la position la plus neutre, recommandée pour une première approche.
En position "GND" (abréviation de "GROUND", "terre" en anglais), on relie le potentiel de la voie à la masse, en le déconnectant du signal d'entrée. Cette position permet de centrer le spot sur l'écran, ou "faire le zéro". Elle ne permet en aucun cas d'étudier le signal.

Boutons de positionnement : Il existe deux boutons permettant de décaler verticalement et horizontalement le spot sur l'écran. On les utilise en général en mode "GND", pour centrer le signal.

Mode de visualisation : Un bouton ou curseur noté souvent "MODE" permet de sélectionner le type de visualisation. Il possède le plus souvent 4 ou 5 positions généralement notées :
- CH. I : pour ne visualiser que la voie I en fonction du temps
- CH. II : pour ne visualiser que la voie II en fonction du temps
- DUAL : Pour visualiser les deux voies en même temps en fonction du temps
- ADD : Pour visualiser la somme des deux signaux en fonction du temps.
- XY : Pour visualiser la voie I en fonction de la voie II.

Réglage de base de temps : Un bouton permet de régler le temps de balayage du spot sur la largeur de l'écran.. On peut donc choisir la valeur temporelle associée à une division de l'écran.

Calibrage en tension Chacune des voies possède un bouton de calibration de tension. Pour chaque voie, chaque division verticale de l'écran aura la valeur en tension fixée par le calibre. Attention ! le bouton est en général surmonté d'un autre bouton appelé "cal" : ce bouton doit être en position calée (position 0) pour que les valeurs lues soient exactes. Ne pas hésiter à faire appel à l'enseignant pour vérifier si ce bouton est en position correcte : il peut fausser l'ensemble des résultats d'une expérience.

2.2.4 Prise en main de l'appareil : Quelques manipulations

Nous allons observer quelques fonctionalités de l'oscilloscope en étudiant un signal simple. Pour cela on utilise un Générateur Basse Fréquence (GBF) qui est un appareil permettant de générer une tension périodique. Il est important de ne pas cofondre le générateur et l'oscilloscope, qui n'ont pas des rôles symétriques :
- le générateur est la **source** du signal. C'est en agissant sur le GBF que l'on décidera de la fréquence et de l'amplitude du signal. Une expérience simple permet de le constater : si on branche un haut parleur sur le GBF, on peut entendre le signal. En réglant la fréquence du GBF, on obtient des sons plus ou moins aigus, en réglant son amplitude, on modifie le volume sonore. Le GBF a donc un rôle **actif**.
- pour analyser le signal, on peut rajouter un oscilloscope au circuit. L'oscilloscope est un instrument de mesure qui ne modifie pas (si il est convenablement branché...) le fonctionnement du circuit. Dans l'exemple ci-dessus, l'insertion de l'oscilloscope ne modifie pas le son. De même, les réglages de l'oscilloscope ne servent qu'à mieux visualiser le signal sur l'écran, mais

ne le modifient pas : en changeant le calibre de temps et celui de tension, le son entendu est le même, seule l'apparence de l'écran est modifiée. L'oscilloscope a donc un rôle passif dans le circuit, il ne sert qu'à l'étudier.

On branche le GBF sur la voie d'entrée 1 ou A de l'oscilloscope à l'aide d'un câble particulier nommé câble coaxial.

Câble coaxial : Un schéma explicatif du câble coaxial est présenté figure 2.2. Ce cable est composé d'un fil de métal

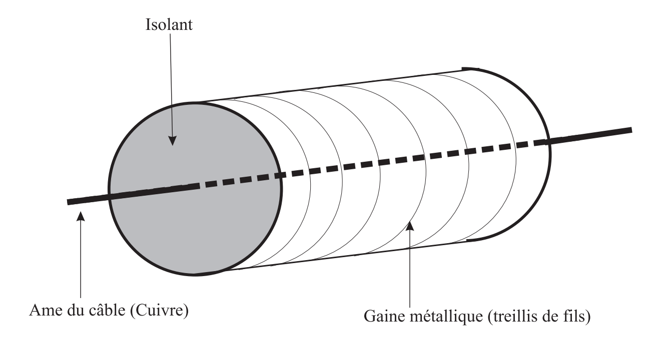


FIG. 2.2 – Coupe schématique d'un câble coaxial

conducteur (généralement du cuivre) appelé âme du câble. Celle ci est entourée d'un isolant (matière plastique). L'isolant est à son tour entouré d'une gaine métallique (treillis de fils permettant de conserver la souplesse du câble). Enfin, le tout est gainé par un revêtement souple isolant (plastique ou caoutchouc).
L'âme est branchée sur la borne positive du circuit à étudier alors que le treillis est branché sur la masse. Ce câble permet donc en un seul branchement de relier la masse du générateur à la masse de l'oscilloscope et la tension de service du générateur à la voie d'entrée de l'oscilloscope.
A retenir : le cable coaxial correspond en réalité à **deux fils électriques**, dont l'un est en général relié à la masse.

Manipulation et prise en main de l'appareil : On se propose d'utiliser l'oscilloscope pour mieux connaître la tension délivrée par le GBF, avant même de construire un circuit.

Pour cela, brancher directement, à l'aide d'un cable coaxial, une des voies de l'oscilloscope sur la sortie du GBF.

Cette partie du TP, quoique importante, ne doit pas prendre trop de temps : ne pas hésiter à faire appel aux enseignants pour résoudre les difficultés, pour pouvoir garder du temps pour la deuxième partie.

On prendra soin de noter brièvement sur le compte-rendu toutes les observations et mesures effectuées ainsi que les commentaires et remarques jugés pertinents.

Forme du signal Sur le GBF, sélectionner une tension sinusoïdale de fréquence approximative 1 kHz. Essayer de visualiser cette tension sur l'oscilloscope en adaptant les boutons de calibre, en visionnant la bonne voie d'entrée, en choisissant un calibre de temps approprié. Noter les valeurs de réglages appropriées sur le compte rendu.
Quelle est la tension moyenne (ou composante continue) délivrée ? Le bouton "AC/DC" change-t-il la forme du signal ? Commenter.
Choisir, sur le GBF, une tension triangulaire, puis carrée. Dessiner un oscillogramme (représentation de l'écran) pour chaque signal. La fréquence du signal est-elle modifiée ? Et son amplitude (valeur max) ? Le bouton "AC/DC" change-t-il la forme du signal ? Penser à revenir en position "DC" pour la suite des manipulations.

Amplitude Revenir sur un signal sinusoïdal. Vérifier grâce à l'oscilloscope que le GBF est capable de fournir des tensions usuelles en électronique (de l'ordre de la dizaine de volts). On pourra essayer de quantifier la plus petite valeur de tension mesurable à l'oscilloscope, ainsi que la plus grande valeur de tension délivrable par le GBF. Cet exercice peut-il se faire sans changer de calibre sur l'oscilloscope ?
Régler la tension de sortie du GBF pour obtenir une valeur maximale (ou tension de crête) $U_{\text{Max}} = 2$ V. Calculer la tension efficace dans ce cas (voir Annexe E).

Fréquence Régler le GBF pour qu'il délivre un signal sinusoïdal de tension maximale 2 V et de fréquence $f = 1000$ Hz. Mesurer sur l'écran de l'oscilloscope la période T du signal, avec une estimation de l'incertitude associée à cette mesure. En déduire la fréquence mesurée f_{mes} du signal, avec son incertitude. Les deux fréquences sont-elles compatibles ?
Modifier le GBF pour qu'il délivre une tension de sortie de fréquence 10 000 Hz, sans changer la base de temps sur l'oscilloscope. La mesure de la période est-elle possible dans ce cas ?

2.3 Mesures électriques sur un montage fondamental

2.3.1 Généralités

On donne ici une petit aperçu théorique de la façon dont sont traités les mesures ou signaux en électronique. Cette approche théorique appelé généralement "théorie du signal" ou "traitement du signal" propose de s'intéresser aux grandeurs physiques uniquement en fonction de l'information qu'elles transportent. Ce cadre, formel, permet d'avoir un point de vue sur l'électronique assez proche de la démarche d'ingénieurie actuelle.

Transformation d'un signal

De façon générale, on définira une "entrée" au circuit électronique ; très souvent, ce sera la tension du générateur. De même, on définira une "sortie", en général une tension. On demandera de visualiser l'entrée et la sortie grâce à l'oscilloscope.

De cette façon, le circuit peut être vu comme une fonction, qui transforme un signal (l'entrée) en un autre (la sortie), comme illustré sur le schéma 2.3. C'est en effet tout l'enjeu de l'électronique : créer des fonctions qui réalisent toutes sortes d'opérations. Cette idée générale a conduit à l'électronoque analogique, qui permet de transmettre, de coder, d'amplifier des signaux ; puis à l'électronique numérique, qui tend aux mêmes buts avec des composants et un formalisme légèrement différents. Ces deux domaines constituent actuellement une des applications majeures des sciences physiques, et certainement celle qui prend la part la plus importante dans notre vie quotidienne.

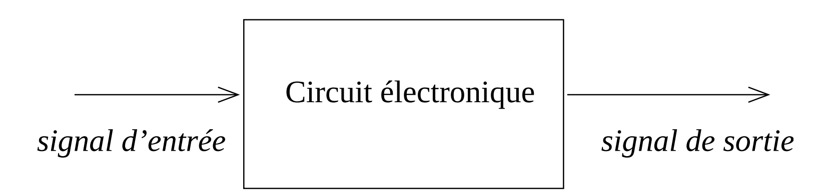


FIG. 2.3 – Représentation schématique très générale d'un circuit électronique.

Variation du comportement d'un circuit en fonction de la fréquence

Les signaux sur lesquels on travaille dépendent du temps : l'oscilloscope permet de visualiser l'amplitude du signal en fonction du temps. Cependant, la représentation temporelle n'est pas la seule possible : *il est souvent plus utile de représenter un signal par la variation de son amplitude en fonction de la fréquence*.

Le principe mathématique qui permet le passage de la représentation temporelle à la représentation fréquentielle est appelé théorème de Fourier :
Toute fonction périodique peut être décomposée en une somme infinie de sinusoïdes. Soit, en écriture mathématique (ω est la pulsation, elle vaut donc $\omega = 2\pi/T$) :

$$\forall f : \mathcal{R} \mapsto \mathcal{R},\ \text{périodique, continue,}\ \exists\ \text{deux suites de réels}\ \{a_n\}_{n\in\mathcal{N}}\ \text{et}\ \{b_n\}_{n\in\mathcal{N}}\ \text{tels que :}$$

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

Cette propriété mathématique est complexe, et donne lieu à toute une théorie du signal (permettant de calculer les coefficients, notament), qui sera vue plus en détail par ceux qui poursuivront des études de physique. Il suffit pour l'instant de retenir que chaque signal utilisé en électronique est la somme d'un certain nombre de sinusoïdes à des fréquences déterminées.

Cette notion est illustrée sur le graphe 2.4, où on peut constater comment recontruire un signal carré à partir d'une somme de sinus.

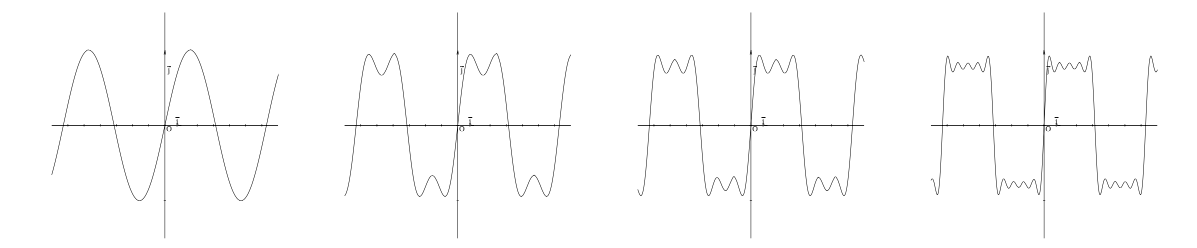


FIG. 2.4 – Reconstruction d'un signal carré par une somme de sinusoïdes. Le premier graphe représente le premier terme de la série ($\sin \omega t$), le deuxième est la somme des deux premiers termes de la série ($\sin \omega t + 0,33 \sin 3\omega t$), le troisième la somme des trois premiers termes, et le dernier la somme des cinq premiers termes.

Question : *Citer des utilisations pratiques de l'électronique où on caractérise les signaux par leurs variations en fonction de la fréquence.*

Diagramme de Bode

Après ce qui a été vu ci-dessus, on comprend qu'on veuille en général caractériser le comportement des circuits électroniques en fonction de la fréquence des signaux d'entrée. Le **diagramme de Bode** est la représentation en fonction de la fréquence de deux grandeurs :
- l'amplitude du signal de sortie divisée par l'amplitude du signale d'entrée (le gain)
- la déphasage du signal de sortie par rapport au signal d'entrée .
En général, les fréquences utilisées en électronique varient sur plusieurs ordres de grandeur, ainsi que les amplitudes des signaux : bien souvent, on choisit donc une représentation logarithmique. Pour le gain, on définit le "gain en décibel" par

$$G_{db} = 20 \log(G)$$

Le diagramme de Bode le plus classique comprendra donc les deux courbes :
- G_{db} en fonction du logarithme décimal de la fréquence $\log(f)$,
- le déphasage φ en radian en fonction de $\log(f)$.

2.3.2 Filtre passe-bas

On se propose d'étudier le circuit simple décrit sur la figure 2.5. Le signal d'entrée sera la tension U_{AM}, aux bornes du générateur, et le signal de sortie sera la tension U_{BM} aux bornes du condensateur. On pourra prendre des valeurs des composantsde l'ordre de grandeur suivant : R $\simeq$ 500 Ω et C $\simeq$ 0,1 μF.

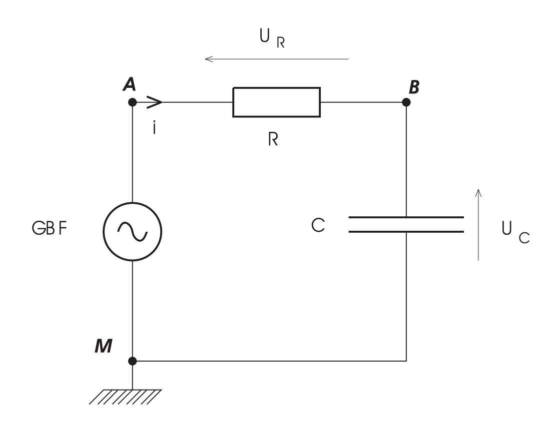


FIG. 2.5 – Circuit du filtre passe-bas

Montage

1. Réaliser le montage de la figure 2.5 en notant soigneusement les valeurs de la capacité C et de la résistance R effectivement utilisées.
2. Brancher une voie de l'oscilloscope sur la tension d'entrée U_{AM}, visualiser et décrire le signal observé (par exemple à l'aide d'un oscillogramme - représentation de l'écran de l'oscilloscope).
3. Brancher la deuxième voie de l'oscilloscope sur la tension de sortie U_{BM}, visualiser et décrire le signal observé.

Diagramme de Bode

1. Définir le gain pour ce montage. Quelle est sa dimension ? Donner la définition du gain en décibel dans ce cas.
2. Mesure du déphasage.
   La définition du déphasage entre le signal de sortie et le signal d'entrée est donnée dans l'annexe E. Pour mesurer le déphasage entre les deux signaux, la méthode la plus simple consiste à mesurer le décalage sur l'écran en carreaux (δt) puis la période sur l'écran en carreaux (T). Puisque une période correspond à 2π radian, on obtient immédiatement le déphasage φ en radian par un simple produit en croix :
   $\varphi = \frac{2\pi\delta t}{T}$ Le signal de sortie peut être en avance de phase par rapport au signal d'entrée (cas a. sur la figure 2.6), δt et φ sont alors positifs, ou bien en retard de phase (cas b.), δt et φ sont alors négatifs.
   Précautions de mesure : il est préférable de mesurer la différence entre deux passages par l'origine, le point étant plus précis que les extréma des courbes (à tangente horizontale). Cependant, il faut être attentif à bien mesurer le décalage entre deux montées ou entre deux descentes, et non pas entre deux passages par 0 (sous peine d'obtenir une valeur fausse à $\pi/2$ près). De même, cette méthode suppose que l'on ait bien réglé le "0" des deux voies (en passant par le mode "GND" pour chaque voie).

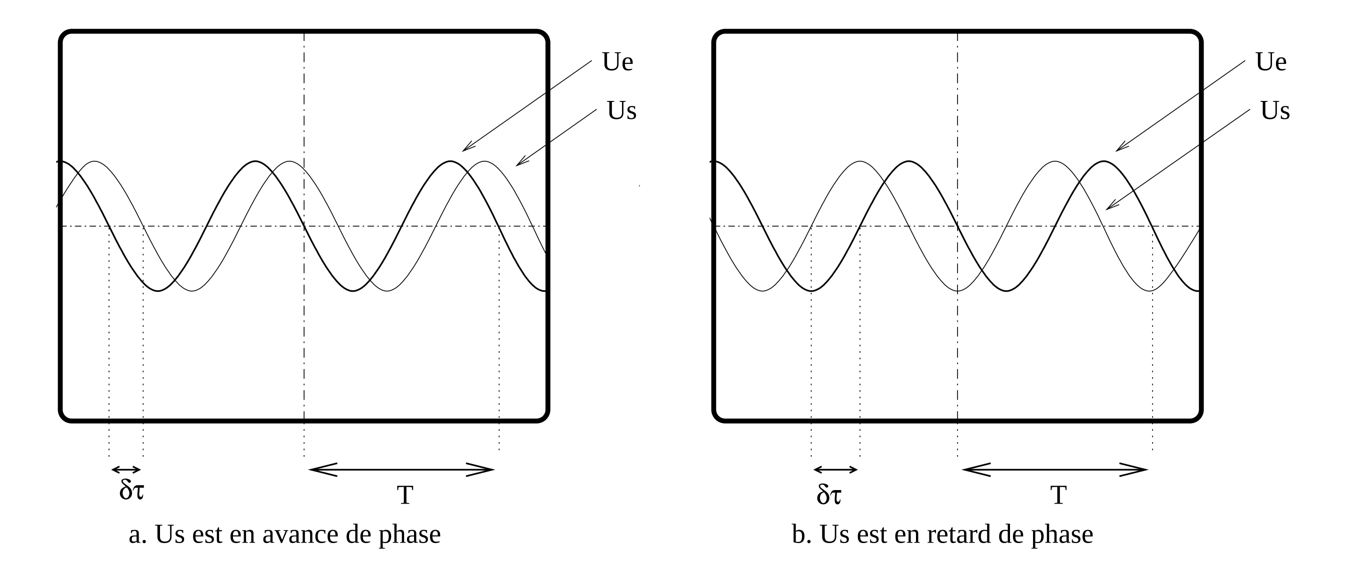


FIG. 2.6 – Lecture du déphasage entre le signal de sortie et le signal d'entrée.

   Relever le déphasage entre le signal de sortie et le signal d'entrée pour deux valeurs de la fréquence : $f_1 = 500$ *Hz et* $f_2 = 20$ *kHz.*

3. Pour une dizaine de fréquences choisies, en gros, entre la centaine de Hertz et quelques dizaines de kiloHertz, relever la valeur du gain en décibel en fonction de la fréquence.
   Rappel : Il est fortement conseillé de procéder en deux fois : une première appréciation rapide et qualitative de la variation de l'amplitude du signal de sortie en fonction de la fréquence doit permettre de choisir un échantillonage pertinent pour l'étude quantitative. Il faudra en particulier resserer l'échantillonnage dans les zones de variation forte.
4. Dessiner sur papier milimétré la courbe du gain en décibel en fonction de la fréquence. Noter les points remarquables, et les asymptotes apparentes en $f \to 0$ et $f \to +\infty$.

5. Commenter qualitativement les résultats obtenus : que valent le gain et le déphasage en basse fréquence ? Quel est alors l'action du circuit sur le signal ? Que valent le gain et le déphasage en haute fréquence ? Quel est alors l'action du montage ? Conclure par rapport au titre de ce montage.

Intérêt

On suppose qu'on introduit en entrée du circuit le signal bruité représenté sur la figure 2.7, qui peut s'écrire :

$$U_{AM}(t) = U_0\,[\sin(\omega t) + a\sin(b\omega t)]$$

avec $\omega = 2\pi f$, $f = 3000$ Hz, $a = 0,2$ et $b = 42$.

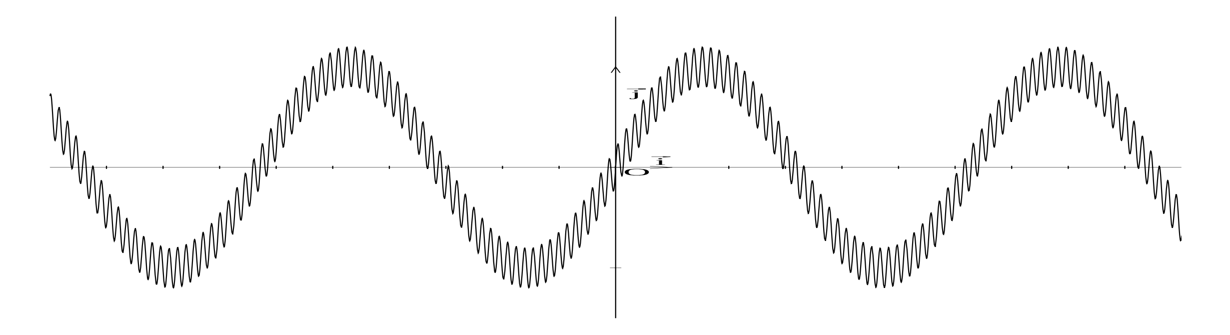


FIG. 2.7 – Signal d'entrée bruité par des parasites à haute fréquence

1. Grâce à la courbe expérimentale représentant la variation du gain, calculer l'atténuation de chaque composante du signal. En déduire l'expression de U_{BM}, le signal obtenu en sortie.
2. Représenter schématiquement le signal de sortie. Commenter.
3. Donner une explication du titre du montage, et en proposer une utilisation pratique.

Travaux Pratiques 3

Mesures et incertitudes

Sommaire

3.1 Introduction

Ce TP a pour objet d'appréhender le sens physique d'une mesure. Pour cela, il y est proposé des manipulations simples sur des billes. Il y est vu comment l'on peut estimer une incertitude expérimentale et comment le processus de mesure peut influencer qualitativement et quantitativement la mesure effectuée. On se propose d'évaluer la masse volumique d'un matériau constituant une bille, et ceci de diverses façons.
On prendra bien soin de détailler les mesures intermédiaires dans le compte rendu (par exemple, lorsque l'on demande de mesurer le rayon d'une sphère, la mesure directe donne le diamètre). Il faut impérativement noter le résultat des mesures directes.

3.2 Manipulation sur une bille - Résultat pour le modèle sphérique

On souhaite déterminer la masse volumique d'une petite bille. Dans un premier temps, on cherche à déterminer la masse de la bille. Dans un deuxième temps, on va chercher à évaluer le volume de la bille.

3.2.1 Evaluation de la masse de la bille

On utilise une balance électronique qui va donner directement une mesure de la masse de la bille.

1. Utiliser la balance pour touver une estimation de la masse de la bille.
2. Estimer l'incertitude absolue Δm_b sur la mesure de la masse. Donner le résultat de la pesée sous la forme :

$$m_b = \text{---} \pm \Delta m_b$$

3. Donner l'incertitude relative $\Delta m_b / m_b$ exprimée en pourcentage. Est-ce beaucoup par rapport à ce que l'on peut attendre d'une mesure avec une telle balance ?
4. Donner un procédé de mesure permettant à votre avis de diminuer l'incertitude de mesure sur la masse de la bille en indiquant clairement quelles sont alors les hypothèses concernant les billes.

3.2.2 Evaluation du volume de la bille - Modèle sphérique

On suppose que les billes sont sphériques. Le volume v_b d'une bille de rayon r_b est donc :

$$v_b = \frac{4\pi}{3} r_b^3$$

1. A l'aide d'un pied à coulisse, estimer le rayon r_b d'une bille.
2. Estimer l'incertitude absolue Δr_b faite sur la mesure.
3. Donner l'incertitude relative $\Delta r_b / r_b$ exprimée en pourcentage.
4. Evaluer littéralement l'incertitude relative $\Delta v_b / v_b$ en fonction de r_b et Δr_b. Evaluer numériquement cette quantité selon la mesure précédente.
5. Si les billes ne sont pas parfaitement sphériques, cette incertitude reste-t-elle correcte ? Comment peut-on espérer améliorer la précision d'une telle mesure ?

3.2.3 Estimation de la masse volumique

La masse volumique ρ d'un objet est définie comme le rapport de sa masse à son volume. On a donc pour le matériau constituant la bille :

$$\rho = \frac{m_b}{v_b}$$

1. Donner l'expression littérale de l'incertitude relative de la masse volumique en fonction des incertitudes relatives sur la masse et le volume de la bille. Donner le résultat numérique issu des mesures, en pourcentage.
2. Calculer numériquement la masse volumique de la bille. Donner le résultat encadré par sa barre d'incertitude.
3. Conclure quant au résultat annoncé.

3.3 Approche statistique

Dans le processus de mesure précédent, il y a deux points importants. Le premier est que l'on estime la masse volumique d'une bille particulière. Si les billes sont légèrement différentes les unes des autres (en masse, en volume ou en masse volumique), alors c'est un fait qui n'est pas pris en compte dans notre évaluation. On peut donc dire que l'on évalue, à l'incertitude donnée près, la masse volumique de la bille prise pour échantillon. Le deuxième point important tient au fait que l'on a supposé que la bille était sphérique. L'incertitude de mesure sur le volume est liée uniquement au fait que l'on a une incertitude de mesure sur le rayon. A aucun moment, on a envisagé la possibilité que les billes pouvaient être légèrement déformées. Pour cette raison, il peut être plus intéressant de mesurer directement le volume.

Mesure du volume

Afin de mesurer directement le volume, on utilise une éprouvette graduée contenant de l'eau. En plongeant la bille dans l'eau, on observe une modification du niveau du liquide. Par différence, on peut donc mesurer le volume de la bille.

1. Par cette méthode évaluer le volume d'une bille.
2. Quelle est l'incertitude absolue ? Quelle est l'incertitude relative (on peut l'estimer par la donnée du constructeur de l'éprouvette mais aussi tenir compte de l'erreur de lecture) ?
3. Comment diminuer l'incertitude relative ?
4. Refaire la mesure avec un nombre N_b de billes identiques. Calculer le volume moyen d'une bille ainsi que son incertitude relative et absolue. Conclure

Mesure de la masse

Afin de diminuer l'incertitude sur la mesure de la masse, on peut faire le même raisonnement.

1. Mesurer la masse de N_b billes identiques. En déduire la masse moyenne d'une bille. Calculer l'incertitude relative et absolue sur la masse d'une bille.
2. Conclure quant à l'efficacité de cette méthode. On s'appliquera en particulier à bien distinguer ce que l'on mesure dans le cas d'une expérience avec plusieurs billes et dans le cas d'une expérience avec une seule.

Calcul de la masse volumique

1. Avec les nouvelles mesures, estimer la masse volumique d'une bille ainsi que sa plage d'incertitude.
2. Donner l'incertitude relative.
3. Ecrire au tableau le résultat obtenu pour la masse volumique avec sa marge d'incertitude. Les résultats des autres groupes sont ils compatibles avec le vôtre ? Faire la moyenne des résultats de tous les groupes. La moyenne est elle dans votre marge d'incertitude ? Conclure.

Travaux Pratiques 4

Thermodynamique : loi des gaz parfaits

Sommaire

On pourra se référer utilement à l'annexe D pour l'élaboration des courbes expérimentales

4.1 Introduction

4.1.1 Rappels

Le but de la manipulation est de mettre en évidence la validité de la loi des gaz parfaits pour l'air. On suggère fortement d'utiliser l'ordinateur et le tableur "Open Office" pour le tracé des courbes.

Loi des gaz parfaits

On appelle "gaz parfait" un gaz formé de particules ponctuelles n'ayant pas d'autres interactions entre elles que des chocs, ceux-ci étant considérés comme élastiques. Un tel gaz vérifie la loi ci-dessous, dite loi des gaz parfaits :

$$PV = nRT \tag{4.1}$$

avec :
- P la pression en pascals (Pa),
- V le volume en mètres cubes (m^3),
- n la quantité de matière en moles (mol) ; on rappelle que $n = m/M$, si m est la masse de l'échantillon (en kg) et M la masse molaire du gaz considéré (en kg.mol^{-1}),
- R la constante des gaz parfait, $R = 8,31$ J.K^{-1}.mol^{-1},
- T la température en kelvins (K).

Le gaz parfait est un modèle, c'est-à-dire une vision approchée de la réalité, qui offre une bonne description de l'air autour des conditions normales de température et de pression. La difficulté de cette loi - comme d'ailleurs de la thermodynamique en général - est qu'elle met en relation quatre variables de statuts équivalents.

Une relation mettant en jeu plusieurs variables

Dans d'autres domaines de la physique, on a en général deux grandeurs, parmi lesquelles la variable s'impose assez simplement : par exemple, en mécanique, c'est le temps qui est la variable naturelle. On calcule donc l'expression de la position en fonction du temps : c'est la trajectoire. Il est rare qu'on veuille calculer le temps en fonction de la position ! Le protocole expérimental est donc simple : le temps varie, on mesure la position, et on trace la courbe $x = f(t)$.

En thermodynamique au contraire, d'une part il y a quatre grandeurs physiques mesurables (le volume, la pression, la température, et la quantité de matière), et, d'autre part, aucune des quatre grandeurs n'a de statut particulier. Il faudra donc choisir parmi ces grandeurs laquelle on prendra comme variable et laquelle sera la fonction mesurée, les autres étant alors fixées à une valeur constante. Ce choix n'est pas définitif, et il se repose à chaque nouveau protocole expérimental.

Prenons l'exemple de la loi 4.1. On veut dans ce TP vérifier sa validité pour un échantillon d'air, autour des conditions normales de température et de pression. Il est impossible de laisser flotter toutes les grandeurs. Le protocole est donc le suivant : on choisit d'abord un couple de grandeurs (une fonction, une variable), et on les étudie en laissant les autres constantes. On passe ensuite à un autre couple, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on ait reconstruit la loi.

Application à la préparation du TP

Voyons en détail ce qu'on fera durant le TP. Dans notre cas, seules trois grandeurs sont mesurables : la pression, la température et le volume. La quantité de matière n'est pas mesurable, mais, puisque le dispositif est étanche, elle reste constante tout au long de l'expérience : nR sera donc considéré comme une nouvelle constante, qu'on peut appeler C. On a donc la loi :

$$\frac{PV}{T} = C \tag{4.2}$$

Remarque : si le piston fuit, la quantité de matière ne sera plus constante et toutes les mesures seront faussées ! Il faut donc bien vérifier l'étanchéité du piston (et au besoin le graisser) avant de commencer les mesures.

On va décomposer la loi 4.2, pour chaque couple de grandeurs, en une loi dérivée. On démontre (cette démonstration est un peu compliquée, nous ne la traiterons pas ici) qu'on peut reconstruire la loi générale à partir d'un nombre x de lois dérivées (x étant égal au nombre de grandeurs moins un). Ici, on s'attachera simplement à vérifier expérimentalement chaque loi dérivée. Voyons comment.

Choisissons d'abord comme couple d'étude la pression et le volume. On choisit (de façon tout à fait arbitraire) le volume comme variable, on voudra donc trouver $P = f_{T=T_0}(V)$, les variations de la pression en fonction du volume, à température constante fixée à $T = T_0$. On injecte ces valeurs dans l'expression 4.2, et on obtient :

$$\frac{PV}{T_0} = C, \quad \text{soit : } P = CT_0 \times \frac{1}{V} \tag{4.3}$$

C'est cette loi dérivée qu'on essaiera de vérifier dans l'expérience 4.2.2. Quelle doit être a priori la forme de la courbe qu'on tracera ? A quel paramètre aura-t-on accés grâce à cette expérience ?

En deuxième partie, on choisit comme fonction le volume, et comme variable la température, à pression constante. La loi dérivée de 4.2 avec ce choix est :

$$\frac{P_0 V}{T} = C, \quad \text{soit : } V = \frac{C}{P_0} \times T \tag{4.4}$$

Quelle est la forme de la courbe qu'on devra obtenir (expérience 4.2.3) ?

On peut montrer que dans ce cas, ces deux expériences sont suffisantes pour reconstruire la loi 4.2. Cependant, on peut aussi s'interesser aux variations de la pression en fonction de la température à volume fixé. La loi qu'on doit vérifier dans ce cas est :

$$\frac{PV_0}{T} = C, \quad \text{soit : } P = \frac{C}{V_0} \times T \tag{4.5}$$

Quelle est la forme de la courbe qu'on devra obtenir ?

On rappelle que dans chaque expression (4.3,4.4 et 4.5), la constante C est la même ($C = nR$).

4.1.2 Description du matériel

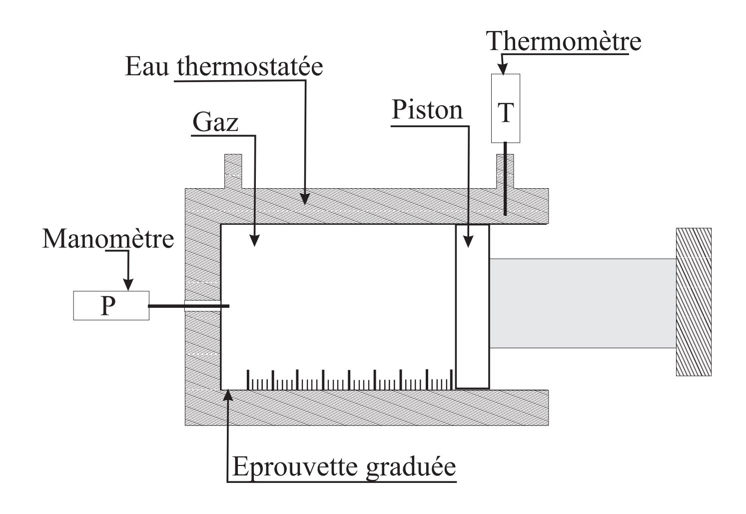


FIG. 4.1 – Schéma du dispositif expérimental

Le matériel d'étude comprend (voir aussi schéma 4.1) :
- une seringue en verre étalonnée, permettant de choisir le volume d'air, et de le mesurer
- une enveloppe en verre, étanche, permettant de maintenir la seringue dans de l'eau, percée de plusieurs ouvertures : une ouverture laisse libre le piston de la seringue, une permet de mesurer la pression en sortie, deux orifices sur le dessus permettent d'introduire l'eau et la sonde du thermomètre,
- un pressiomètre et un thermomètre, à affichage numérique.

4.1.3 Mise en garde

Il est recommandé d'être particulièrement prudent durant les manipulations, aussi bien pour ne pas déteriorer le matériel que pour éviter de se blesser. On notera en particuliers les points suivants :

1. Le matériel de TP est en verre : il ne résistera pas à une chute. Ne déplacer le dispositif que lorsque c'est absolument nécessaire, et avec précautions (veiller notamment à ne pas laisser glisser la seringue hors de son fourreau).
2. Chaque élément du matériel ne fonctionne correctement que dans une certaine plage de valeurs, en général indiqué sur l'appareil : attention à ne jamais dépasser les valeurs limites.
3. Eviter de répandre de l'eau partout, et surtout sur les appareils électroniques ou les prises électriques. En particulier, prendre garde aux ouvertures de l'enveloppe qui doivent rester orientées vers le haut...
4. La manipulation fait intervenir des températures relativement élevées (80 à 90˚C maximum), très suffisantes pour se brûler sérieusement. Il faut donc être attentif à toujours saisir le matériel loin des points de chauffage.
5. Attention, le dispositif de chauffage n'est pas thermostaté : s'il est laissé allumé sans ampoule d'eau au-dessus (qui joue le rôle de récupérateur de la chaleur émise), sa température augmente jusqu'à destruction de l'appareil.

4.2 Manipulation

4.2.1 Etude préliminaire

Relever les limites en température et en pression de chaque appareil, et en déduire les valeurs à ne pas dépasser pendant la manipulation. On prendra une marge de 15% afin d'éviter les risques.

4.2.2 Variation à température constante

Aspect qualitatif

Avant de commencer la manipulation, noter sur le compte rendu le sens de variation attendu de la pression lorsqu'on diminue le volume de l'échantillon, à quantité de matière et température constantes. On justifiera la réponse par une phrase.

Mesures

On prendra un échantillon initial d'air dans la seringue (à température et pression ambiante) de 60 mL environ (noter la valeur exacte sur le compte rendu). Remplir l'enveloppe d'eau à la température ambiante (noter celle-ci). En jouant sur le piston de la seringue, faire varier le volume, et relever les valeurs du volume et de la pression. On effectuera une dizaine de mesures à l'intérieur des limites fixées au 4.2.1.

Représentation graphique

On veut faire apparaître sur un graphe les variations de la pression en fonction de celles du volume, à température constante (historiquement, cette fonction fut appelée loi de Boyle-Mariotte). Tracer la courbe $P = f(V)$, puis $P = f(1/V)$. Commenter l'allure des deux courbes. Laquelle sera la plus facilement exploitable ?

Exploitation des mesures

Calculer la pente de la droite obtenue, ainsi que son incertitude. En déduire la quantité de matière de gaz présente dans l'échantillon. On veillera à donner le résultat avec l'incertitude associée.

4.2.3 Variation à pression constante

Aspect qualitatif

Quel est la pression du gaz lorsque le piston est laissé libre ? Pourquoi ? On pourra s'aider d'un schéma pour justfier la réponse.

Mesures

Sans débrancher le pressiomètre, faire augmenter la température grâce au système de chauffage. En maintenant la pression constante (en jouant sur le piston si celui-ci ne glisse pas suffisament), relever les valeurs de la température et du volume. On effectuera une dizaine de mesures à l'intérieur des limites fixées au 4.2.1.

Représentation graphique

On veut faire apparaître sur un graphe les variations du volume en fonction de celles de la température, à pression constante (historiquement, cette fonction fut appelée loi de Gay Lussac). Choisir les variables les plus adaptées à la représentation graphique, et tracer la courbe. La courbe est-elle qualitativement conforme aux prévisions théoriques ?

Exploitation des mesures

Calculer la pente de la droite obtenue, ainsi que son incertitude. En déduire la quantité de matière de gaz présente dans l'échantillon. On veillera à donner le résultat avec l'incertitude associée. Le résultat est-il compatible avec celui calculé au 4.2.2 ? Justifier.

Travaux Pratiques 5

Calorimétrie : étude de capacités calorifiques.

Sommaire

On pourra se référer utilement à l'annexe D pour l'élaboration des courbes expérimentales

5.1 La calorimétrie, étude des échanges de chaleur

La thermodynamique s'occupe des variations d'état des systèmes du point de vue macroscopique, les échanges entre énergie thermique et travail mécanique. Concrètement, c'est la science des machines thermiques (frigos, moteur à essence, etc.). Cette science est née au début du XIXème siècle, notament avec l'ingénieur Sadi Carnot (Nicolas Léonard Sadi Carnot, ingénieur polytechnicien, 1796-1832, oncle du président de la république Marie François Sadi Carnot). La calorimétrie est la partie de la thermodynamique qui s'occupe des mesures de quantités de chaleurs. Nous allons définir ci-dessous quelques notions fondamentales de la calorimétrie.

5.1.1 Qu'est-ce que la chaleur ?

En sciences physiques les deux notions de température et de quantité de chaleur sont fondamentalement différentes :

- la **température** θ est une **variable d'état d'un système**, c'est à dire que c'est un des paramètres dont on se servira en physique pour caractériser ce système (comme aussi le volume ou la pression). Elle s'interprète au niveau particulaire comme l'agitation des particules élémentaires qui constituent le corps étudié : plus l'agitation interne est élevée, plus la température mesurée sera grande. Son unité dans le système international est le kelvin (K).

- la **quantité de chaleur** (ou transfert thermique), en général notée Q, est **un échange d'énergie non accompagné de mouvement macroscopique**. Q s'exprime donc en joules (J), l'unité de l'énergie dans le système international. La quantité de chaleur peut donc être interprétée d'un point de vue microscopique comme la propagation de l'agitation moyenne des particules.

5.1.2 Lien entre échange de chaleur et différence de température

Voyons sur un exemple comment sont reliées les deux notions : soient deux corps à des températures différentes θ_1 et θ_2 en contact thermique (par exemple, l'air de la pièce et une tasse de café chaud). Au bout d'un certain temps, on constate que les deux corps sont à la même température : ils ont atteint un équilibre thermique. On parle d'équilibre puisque , une fois la température commune atteinte, θ_1 et θ_2 ne varient plus (le café ne redevient pas brûlant, ni ne se refroidit plus que la température de la pièce). Il y a donc eu transfert d'énergie d'un corps à un autre sans mouvement d'ensemble : il y a eu échange de chaleur.

On voit sur l'exemple ci-dessus que les échanges de chaleur sont conditionnés par une différence de température. Quel est l'expression exacte de la quantité de chaleur en fonction de la différence de température ? On s'intéressera ici à la quantité de chaleur reçue (ou cédée) par un corps *en phase condensée*, c'est à dire soit sous forme solide, soit sous forme liquide, lorsqu'il passe de la température initiale θ_1 à la température finale θ_f *sans changer de phase*. Lorsqu'on cherche à mesurer la quantité de chaleur échangée par ce corps, on constate que celle-ci est proportionnelle à la différence de température :

$$Q_1 = C(\theta_f - \theta_1) \tag{5.1}$$

C est une constante caractéristique du corps considéré, que l'on appelle **capacité calorifique** du corps. Son unité dans le système international est le J.K^{-1} (joule par kelvin).
On définit également la **capacité calorifique massique** C_m du corps : $C_m = C/m$, où m est la masse de l'échantillon étudié. *La capacité calorifique massique d'un corps est donc la quantité d'énergie à apporter à un kilogramme de ce corps pour augmenter d'un degré sa température*. Son unité dans le système international est le joule par kelvin et par kilogramme (J.K^{-1}.Kg^{-1}). On peut donc exprimer la relation 5.1 en utilisant ce nouveau paramètre :

$$Q_1 = mC_m(\theta_f - \theta_1) \tag{5.2}$$

5.1.3 Changement d'état

Il se peut que, lors d'un échange de chaleur, le corps étudié change de phase : par exemple, le glaçon mis dans une boisson pour la refroidir va se transformer en eau liquide. Ce changement de phase s'effectue grâce à un échange de chaleur mais *à température constante*. La quantité de chaleur mise en jeu est alors simplement proportionnelle à la masse de l'échantillon étudié :

$$Q = mL \tag{5.3}$$

La constante L est caractéristique du corps et du changement d'état, on l'appelle **chaleur latente** du changement de phase du corps (par exemple, chaleur latente de fusion de l'eau dans le cas d'un glaçon). *C'est la quantité d'énergie nécessaire pour faire changer d'état un kilogramme du corps*, son unité est donc le joule par kilogramme (J.kg^{-1}).

On rappelle les différents changement d'états dans le schéma 5.1.

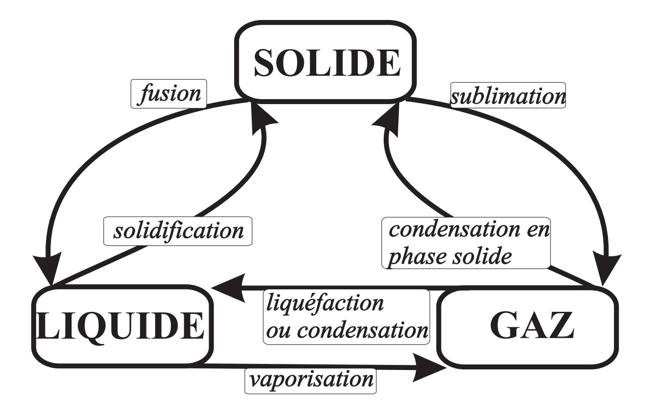


FIG. 5.1 – Phases et changements d'état

5.1.4 Première loi de la thermodynamique et système isolé

On a vu comment on pouvait évaluer la quantité de chaleur cédée ou acquise par un corps, lors d'un changement d'état ou de température. Mais, puisqu'il y a échange de chaleur, c'est donc que deux systèmes, au minimum, sont en contact. En

général, on essaie, pour faciliter l'étude, de se limiter effectivement à deux corps, et de mesurer leurs échanges. On dit alors que les deux corps constituent un **système isolé** : il n'échangent pas d'énergie avec l'extérieur.

Les systèmes isolés ont une importance fondamentale en théorie parcequ'on peut leur appliquer la première loi de la thermodynamique, la loi de conservation de l'énergie : *pour un système n'échangeant ni travail ni chaleur avec l'exterieur, la variation totale d'énergie au cours d'une transformation est nulle.* Dans le cas qui nous interesse, on dira donc que toute la quantité de chaleur fournie par un des corps est reçue par l'autre. Mathématiquement, on écrit :

$$Q_1 + Q_2 = 0 \tag{5.4}$$

On suppose ici que Q_1 et Q_2 sont des grandeurs algébriques : une quantité de chaleur reçue est comptée positivement pour le système, une quantité de chaleur cédée est comptée négativement pour le système.

Comment réaliser, de façon pratique, un tel système isolé ? Il s'agit avant tout de limiter les échanges thermiques avec l'extérieur (en général l'air du laboratoire, à température ambiante). Les récipients qui remplissent cette fonction sont appelés des **calorimètres**. Il en existe plusieurs sortes ; les salles de TP sont équipées de **vases Dewar**. L'isolation est réalisée grâce à un vide qui est créé entre deux parois de verre (l'application quotidienne du vase Dewar est la bouteille "thermos"). Un schéma du vase Dewar est présenté sur la figure 5.2.

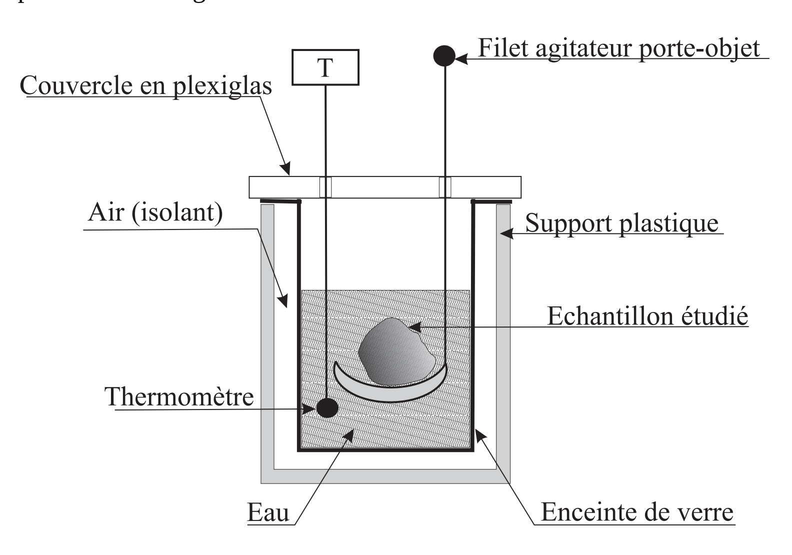


FIG. 5.2 – Schéma d'un calorimètre classique : le vase Dewar

5.1.5 Application aux mesures en calorimétrie

Le principe de la calorimétrie est de mesurer expérimentalement les capacités calorifiques massiques et les chaleurs latentes de différents corps. Dans ce but, on utilise en général la méthode dite des mélanges : on mélange dans un calorimètre le corps à mesurer et un liquide (l'eau en général) de capacité calorifique massique connue. Le calorimètre a pour but d'isoler thermiquement le mélange : on peut donc écrire que la quantité de chaleur cédée par le corps à étudier est la même que la quantité de chaleur reçue par l'eau. On détaille ci-dessous les deux cas figurant dans le TP.

Chaleur latente de fusion de l'eau

Un échantillon de glace de masse m_g à température θ_g est plongé dans un échantillon d'eau de masse m_e à température θ_e. Au bout d'un certain temps, les glaçons ont fondu et le calorimètre est rempli d'une masse $m_f = m_g + m_e$ d'eau à la température θ_f. On cherche à déterminer la chaleur latente de fusion de la glace, en supposant connues les capacités calorifiques massiques de l'eau liquide et de l'eau solide.

1. Ecrire l'expression de la quantité de chaleur Q_1 cédée par l'eau initialement dans le calorimètre.
2. Ecrire l'expression de la quantité de chaleur Q_{2_1} nécessaire pour mener les glaçons de la température θ_g à la température de fusion de la glace (θ_s = 0 º C = 273 K, à 1013 hPa).
3. Ecrire ensuite l'expression de la quantité de chaleur Q_{2_2} nécessaire pour transformer les glaçons en eau liquide, à température constante θ_s.

4. Ecrire enfin l'expression de la quantité de chaleur Q_{2_3} nécessaire pour mener la masse de glaçons fondus de la température de fusion de la glace θ_s à la température finale θ_f .
5. En déduire la quantité de chaleur totale Q_2 reçue par l'échantillon de glaçons (voir schéma 5.3).
6. En écrivant le principe de conservation de l'énergie, donner la relation entre Q_1 et Q_2.
7. En déduire l'expression littérale de L, chaleur latente de fusion de l'eau, en fonction des grandeurs mesurées.

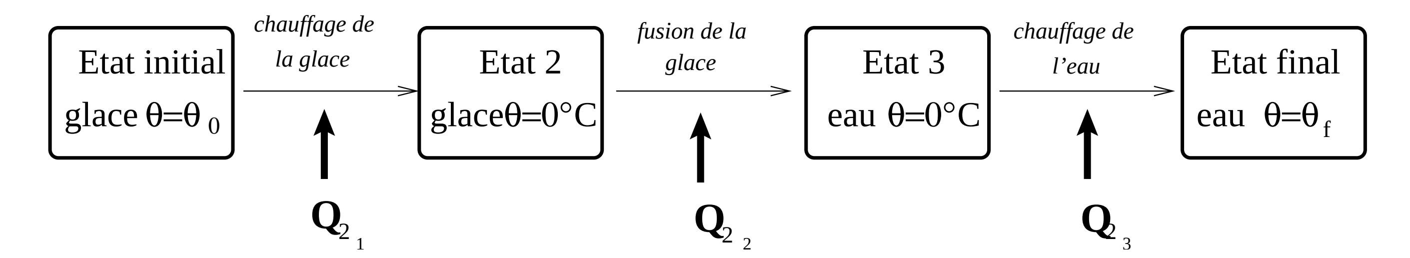


FIG. 5.3 – Schéma représentant les trois étapes de la transformation de la glace froide (à θ_g) en eau tiède (à θ_f).

Capacité calorifique massique d'un solide

Un échantillon de masse m_c du corps étudié, à la température θ_c, est plongé dans un échantillon d'eau de masse m_e à température θ_e (en général, on prendra θ_e<θ_c). Au bout d'un certain temps, la température de l'eau (la seule facilement mesurable) se stabilise à θ_f. On cherche à déterminer la capacité calorifique massique du corps étudié, en supposant conn ue la capacité calorifique massique de l'eau liquide.
1. Ecrire l'expression de la quantité de chaleur Q_1 reçue par l'eau.
2. Ecrire l'expression de la quantité de chaleur Q_2 cédée par le corps.
3. En écrivant le principe de conservation de l'énergie, donner la relation entre Q_1 et Q_2. En déduire l'expression littérale de C_m^c, capacité calorifique massique du corps, en fonction des grandeurs mesurées.

5.1.6 Données

On donne quelques grandeurs nécessaires à la manipulation :
- capacité calorifique massique de l'eau autour des conditions normales de température et de pression : $C_m^0 = 4185$ J/kg/K
- capacité calorifique massique de la glace autour des conditions normales de température et de pression : $C_m^g = 2100$ J/kg/K

5.2 Manipulation

5.2.1 Préparation

Description du matériel

Le matériel d'étude comprend, pour chaque binôme :
- un calorimètre (vase isolant en verre) équipé d'un couvercle, d'un thermomètre et d'un agitateur,
- un bécher en plastique et une petite passoire pour récupérer les matériaux utilisés,
- une balance électronique,
- une interface et un ordinateur pour l'acquisition des données.

En outre, la salle dispose de trois appareils mis en commun : un congélateur, un bain marie et un bac d'eau chaude. Le congélateur fournit des glaçons, le bain-marie permet de chauffer les corps dont on veut déterminer la capacité calorifique massique. Chaque binôme devra donc se déplacer pour aller chercher son échantillon chaud ou ses glaçons.

Mise en garde

Il est recommandé d'être particulièrement prudent durant les manipulations, aussi bien pour ne pas déteriorer le matériel que pour éviter de se blesser. On notera en particuliers les points suivants :

i) Les calorimètres sont extrêmement fragiles. Ils sont constitués de deux parois de verre séparées par du vide, ce qui permet de diminuer considérablement les échanges thermiques. Le calorimètre peut donc imploser si il est manipulé trop brutalement, ou si il tombe par terre. Pour que le calorimètre fonctionne (c'est à dire pour qu'il isole thermiquement son contenu), il faut naturellement qu'il soit fermé : on prendra donc soin de refermer rapidement le calorimètre après y avoir introduit les produits.

ii) Chaque élément du matériel ne fonctionne correctement que dans une certaine plage de valeurs, en général indiqué sur l'appareil : attention à ne jamais dépasser les valeurs limites.

iii) Eviter de répandre de l'eau partout, et surtout sur les appareils électroniques ou les prises électriques. Utiliser des éponges et le rouleau mis à disposition dés qu'une inondation menace...

iv) La manipulation fait intervenir des températures élevées (100 º C), très suffisantes pour se brûler sérieusement. Il faut donc être attentif à ne pas renverser de l'eau bouillante sur ses doigts, ou sur un camarade, et à ne pas toucher les matériaux chauds directement.

5.2.2 Chaleur latente de fusion de la glace

Cette première manipulation a pour objet de déterminer la chaleur latente de fusion de la glace. Dans ce but, on introduira dans le calorimètre de l'eau chaude et de la glace selon le protocole défini ci-dessous. La mesure de la température finale du mélange doit permettre de calculer la grandeur recherchée.

Remarques : Pour obtenir un résultat aussi précis que possible, on veillera à employer une grande quantité de glaçons (à peu près autant que ce que peut en contenir le calorimètre). Pendant la phase de mélange, il est très important d'agiter continuellement.

Expliquer pourquoi il est nécessaire d'agiter le mélange.

Mesures

Peser d'abord le calorimètre et ses accessoires : on notera m_1 le résultat de cette mesure. Remplir (aux deux tiers environ) le calorimètre d'eau chaude, et peser l'ensemble. On note m_2 la valeur de cette deuxième pesée. Déduire de m_2 et m_1 la masse m_e d'eau contenue dans le calorimètre.

Noter la température θ_e de l'eau chaude dans le calorimètre. Noter également la température θ_g du congélateur. Introduire plusieurs glaçons dans le calorimètre et observer la variation de la température θ du mélange en fonction du temps. Lorsque la température semble avoir atteint son état d'équilibre (température constante), noter cette valeur θ_f avec l'incertitude correspondante. Peser alors la masse m_3 de l'ensemble. A quelle grandeur a-t-on accés grâce à cette pesée ?

Exploitation des mesures

En écrivant que les transferts thermiques entre l'eau et la glace se sont faits dans un système isolé (pas d'échange avec l'extérieur, donc la quantité de chaleur cédée par l'eau chaude est intégralement absorbée par la glace), calculer la chaleur latente de fusion de la glace.

5.2.3 Capacité calorifique massique du cuivre et du verre

On désire mesurer la capacité calorifique massique du cuivre et du verre. On utilisera pour ces deux mesures le même protocole expérimental, décrit ci-dessous avec le matériau X. L'ordre dans lequel on effectuera les deux mesures est indifférent.

Remarques : Pour que l'expérience donne un résultat satisfaisant, le matériau doit être **sec**.

Expliquer succintement en quoi l'utilisation d'un matériau mouillé modifie le résultat de l'expérience.

Par ailleurs, pour obtenir un résultat aussi précis que possible, on veillera à employer une grande quantité du matériau (à peu près autant que ce que peut en contenir le calorimètre). On rappelle que pendant la phase de mélange, il est très important d'agiter continuellement.

Mesures

Peser d'abord le calorimètre et ses accessoires : on notera m'_1 le résultat de cette mesure. Remplir (aux deux tiers environ) le calorimètre d'eau à température ambiante (θ'_e), et peser l'ensemble m'_2. Noter la température θ'_x du matériau au bain marie, avant de l'introduire dans le calorimètre et observer la variation de la température θ du mélange en fonction du temps. Lorsque la température semble avoir atteint son état d'équilibre (température constante), noter cette valeur θ_f avec l'incertitude correspondante. Peser alors la masse m'_3 de l'ensemble. A quelle grandeur a-t-on accés grâce à cette pesée ?.

Exploitation des mesures

En écrivant que les transferts thermiques entre l'eau et le matériau se sont faits dans un système isolé, calculer la capacité calorifique massique du matériau.

Conclusion

Comparer les capacités calorifiques massiques des deux matériaux considérés. Commenter. Ces capacités calorifiques massiques peuvent-elles, en l'état, être comparées à la chaleur latente de fusion de la glace calculée en 5.2.2 (on pensera en particulier à considérer leur dimension physique) ? Développer.